

能源经济预测与展望研究报告

FORECASTING AND PROSPECTS RESEARCH REPORT

CEEP-BIT-2024-002 (总第 74 期)



低碳技术发展产业链风险评估和展望

2024 年 1 月 7 日

北京理工大学能源与环境政策研究中心

<http://ceep.bit.edu.cn>

能源经济预测与展望研究报告发布会

主办单位：北京理工大学能源与环境政策研究中心

碳中和系统工程北京实验室

能源经济与环境管理北京市重点实验室

协办单位：北京理工大学管理与经济学院

碳中和系统与工程管理国际合作联合实验室

北京经济社会可持续发展研究基地

中国“双法”研究会能源经济与管理研究分会

中国能源研究会能源经济专业委员会

《煤炭经济研究》编辑部

中国煤炭学会碳减排工程管理专业委员会

特别声明

本报告是由北京理工大学能源与环境政策研究中心研究团队完成的系列研究报告之一。如果需要转载，须事先征得中心同意并注明“转载自北京理工大学能源与环境政策研究中心系列研究报告”字样。

低碳技术发展产业链风险评估和展望

执笔人：余碧莹、魏一鸣、符家豪、戴盈、陈又源、罗馨怡、徐硕

作者单位：北京理工大学能源与环境政策研究中心

联系人：余碧莹

研究资助：国家自然科学基金项目（72293600，72225010）



北京理工大学能源与环境政策研究中心

北京市海淀区中关村南大街5号

邮编：100081

电话：010-68918551

传真：010-68918651

E-mail: yubiyong_bj@bit.edu.cn

网址: <http://ceep.bit.edu.cn>

Center for Energy and Environmental Policy Research

Beijing Institute of Technology

5 Zhongguancun South Street, Haidian District, Beijing 100081, China

Tel: 86-10-68918551

Fax: 86-10-68918651

E-mail: yubiyong_bj@bit.edu.cn

Website: <http://ceep.bit.edu.cn>

低碳技术发展产业链风险评估和展望

一、全球低碳技术将迎来大规模发展，由此可能引发产业链风险

《巴黎协定》就国际社会共同应对气候变化的目标达成了共识，即将全球平均温升控制在 2°C ，并努力限制在 1.5°C 以内。为实现这一目标，全球已有 150 余个国家做出“零碳”、“碳中和”承诺。世界低碳转型全面加速，各行业各部门的低碳技术将迎来大规模发展。

作为负责任的发展中大国，中国积极为全球气候治理贡献力量，提出碳达峰碳中和的重要战略目标，致力于用全球历史上最短的时间从碳达峰到碳中和。“双碳”目标的实现需要能源供给端和需求端同时发力，既需供给端通过大规模发展低碳发电技术、氢能技术和储能技术以逐步摆脱对化石能源的依赖，也需要需求端通过推动工业行业节能减排技术快速应用来实现高耗能行业低碳转型。为充分发挥低碳技术对实现“双碳”目标的关键支撑作用，中国制定了《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030 年）》等一系列政策方针，为低碳技术的发展与应用指明了方向。

然而，低碳技术大规模普及，在替代传统技术和产业生产活动的同时，将带来新的产业价值和就业需求，由此可能引发产业链关键环节原材料、资金和劳动力等要素供需失衡以及部分行业环境影响攀升等潜在风险；此外，由于各部门之间的联动效应，低碳技术的蓬勃发展还可能通过产业链的传递，对其它关联行业产生间接促进或抑制作用。如不提前应对，势必威胁产业链安全，制约国家节能减排目标的实现。在此背景下，亟需回答“双碳”目标下，关键低碳技术大规模

发展会对产业链上相关行业的原材料、资金、劳动力需求和污染物排放等方面造成什么影响？将会引致哪些产业链风险？

为了回答上述问题，北京理工大学能源与环境政策研究中心魏一鸣教授团队（简称“中心团队”）推出低碳技术发展产业链风险评估和展望报告。鉴于氢能和储能技术是未来实现清洁用能的关键支柱，同时，电力、钢铁和水泥等行业属于碳密集型部门，因此本报告基于国家实现“双碳”目标的低碳技术需求，综合考虑能源供给端和需求端，针对上述技术领域和部门，选取了未来可能会大规模普及的电解水制氢、电化学储能、低碳发电技术（包括生物质发电、核电、水电、陆上风电、海上风电和光伏发电）、钢铁行业电弧炉炼钢技术及水泥行业多通道燃煤技术共计 10 种代表性低碳技术作为研究对象，从“技术-组件-上中下游行业”视角，评估到 2030 年各项技术大规模普及对产业链相关行业原材料、资金、劳动力需求和污染物排放的综合影响，识别潜在风险，提前引导相关投入要素再分配以适应产业链调整和技术发展，从而为产业链风险防范提供科学依据，确保我国“双碳”目标顺利实现。

二、低碳技术发展引致的产业链风险评估

为捕捉低碳技术大规模发展可能引发的产业链上原材料、资金和劳动力等要素供需失衡以及部分行业环境影响攀升风险，本报告首先采用自主研发的 C³IAM/NET 模型优化得到实现“双碳”目标所需要的低碳技术普及率或装机规模，进一步以此为发展目标，针对低碳发

电技术、电解水制氢技术和电化学储能技术构建扩展型投入产出模型，针对电弧炉炼钢技术和多通道燃煤技术构建计量经济学模型，从产业链视角评估低碳技术在 2024~2030 年间规模化应用对上中下游行业原材料、资金、劳动力的新增需求以及污染物（SO₂、NO_x、PM_{2.5}）排放变化，并分析其引发的潜在风险，具体结论如下所述。

（一）“双碳”目标下关键低碳技术发展目标

图 1 展示了“双碳”目标下上述 10 种关键低碳技术的发展趋势。根据魏一鸣等（2022）提出的中国碳达峰碳中和时间表与路线图，为实现国家碳达峰目标，2030 年，电弧炉炼钢技术和多通道燃煤技术的普及率需分别增至 13.7%和 50%。此外，生物质发电、核电、水电、陆上风电、海上风电、光伏发电、电解水制氢和电化学储能技术 2030 年的装机容量需分别达到 57GW、125GW、428GW、706GW、62GW、1060GW、37.7GW 和 161.3GW（魏一鸣等, 2022; IEA, 2021; IPCC, 2021）。

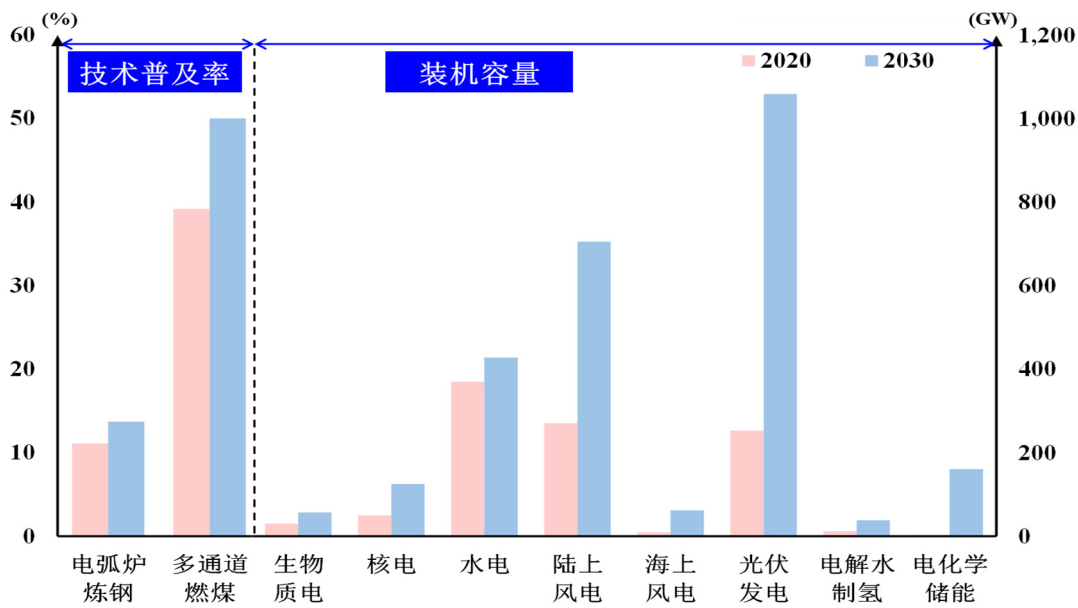


图 1 “双碳”目标下关键低碳技术发展趋势
数据来源：魏一鸣等(2022); IEA(2021); IPCC(2021).

（二）关键原材料需求预测及供应风险评估

由于低碳发电技术和电化学储能技术是矿产原材料密集型技术，因此，对这两类技术进行原材料需求预测。研究结果表明（图2），为实现碳达峰目标，2024~2030年，低碳发电技术和电化学储能技术的大规模发展对铝、铁、硅、铜、锌的累计需求量位居前五。锂、钴、锰、镍、铜需求量的复合增速较快，分别达到32%、31.7%、11.5%、9.64%、和9.1%。其中，钴、镍、铜和锰的对外依存度分别高达97%、92%、83%和82%，四种矿产资源的需求增速快且对外依存度高，面临短缺的风险相对更大。

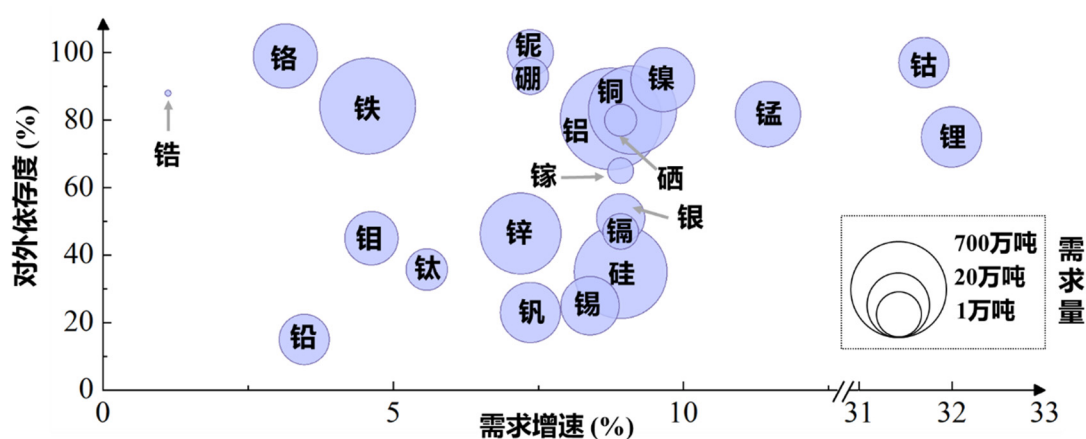


图2 低碳发电技术和电化学储能技术发展的关键矿产资源需求
数据来源：对外依存度数据来自 Gulley et al.(2018); 海通国际研报。

（三）资金、劳动力和环境层面产业链风险评估

图3展示了2024~2030年低碳技术发展对产业链资金和劳动力需求的综合影响。在我国碳达峰目标驱动下，低碳发电技术、电解水制氢技术、电化学储能技术、电弧炉炼钢技术和多通道燃煤技术2024~2030年累计使产业链上相关行业整体资金需求增加18.34万亿元，约占中国2022年GDP的15.2%；使产业链上相关行业整体劳动

力需求增加 657.73 万人,超过 2022 年全国城镇新增就业总量的一半。具体来说,资金需求层面,低碳发电技术对产业链关联行业资金需求影响最大,该技术发展驱动关联行业资金需求新增 16.43 万亿的同时,对传统煤电的替代将使投资需求减少 2.91 万亿元。劳动力需求层面,电化学储能技术的促进作用最大,达 248.08 万人。可见,低碳技术对产业链上相关行业的劳动力和资本等要素投入影响十分显著,需警惕由此引发的资金和劳动力供给不足等产业链风险以及传统技术相关行业劳动力和投资过剩问题。

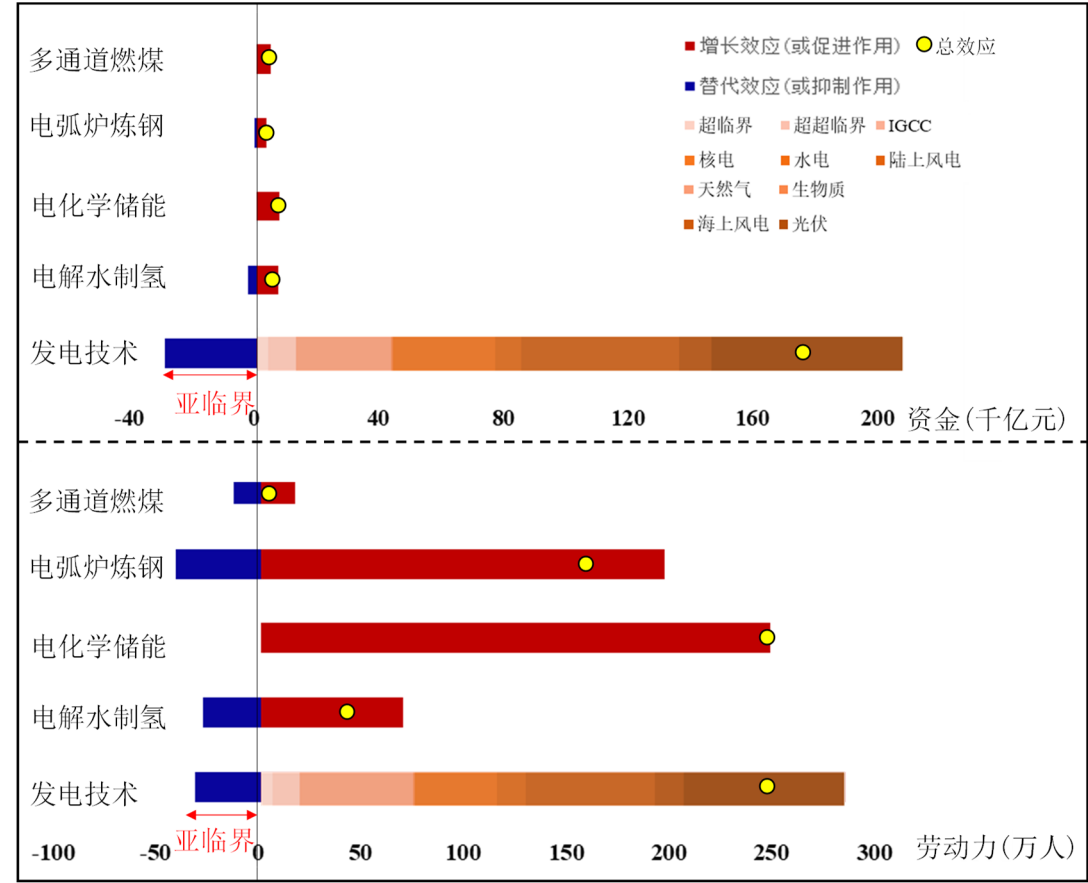


图 3 2024~2030 年低碳技术发展对产业链资金和劳动力需求总影响

从技术产业链视角来看,为发展低碳发电技术,产业链上各行业需增加资金和劳动力投入并扩大生产规模,2024~2030 年间,产业链

资金需求增加 16.43 万亿元，劳动力需求新增 210.34 万人，空气污染物增加 25.31 万吨。产业链各环节受到技术规模扩大的影响有明显差异。以对产业链资金需求(+6.13 万亿元)、劳动力需求(+78.23 万人)和空气污染物(+10.56 万吨)影响最大的光伏发电技术为例展开分析¹。在光伏发电技术产业链(图 4)中，主要受影响的是上游的光伏组件制造环节。其中，由于光伏发电技术对太阳能电池片、背板、接线盒、逆变器等光伏组件和元器件的需求大幅增加，导致电气机械和器材制造行业的资金(+3.16 万亿元)和劳动力需求(+20 万人)增长最多。此外，光伏组件上游的光伏玻璃制造相关行业(非金属矿物制品)环境影响最为明显，空气污染物排放预计增加 7.19 万吨。

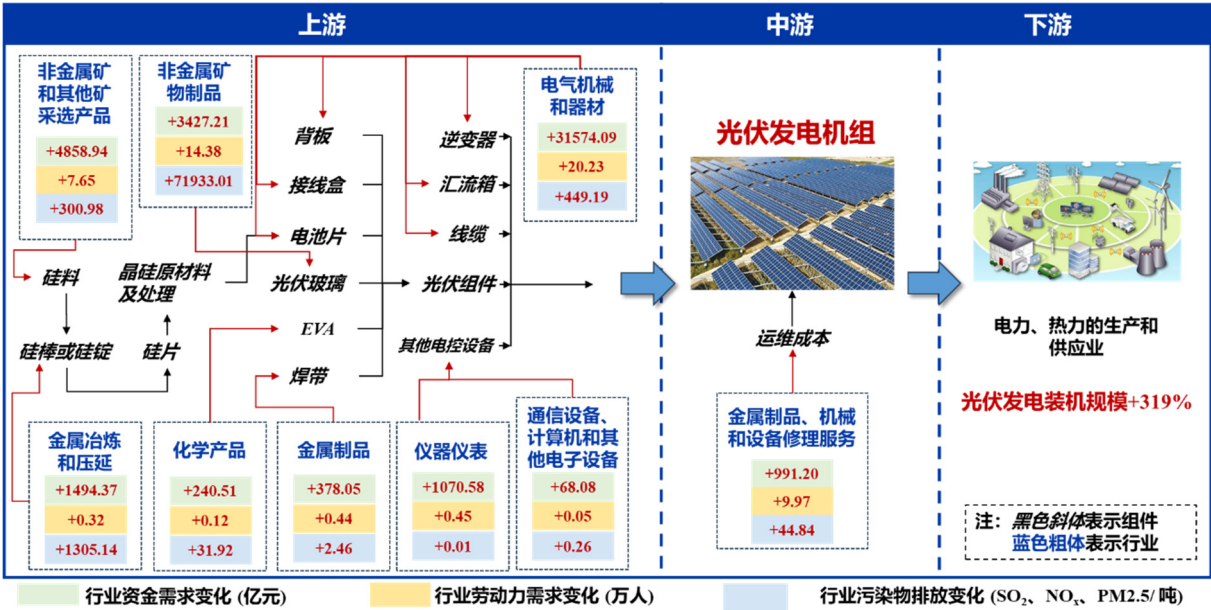


图 4 光伏发电技术产业链风险图 (例)

图 5 是电解水制氢技术产业链风险图。2024~2030 年，电解水制氢技术的大规模发展联动关联行业新增资金需求 7024 亿元，新增劳

¹ 由于篇幅有限，本报告仅展示光伏发电技术和电解水制氢技术产业链风险图，如对其他技术详情感兴趣，请联系作者。

动力需求 69 万人，导致空气污染物排放增加 6.8 万吨。由于该技术运行需要消耗大量电力，中游的电力、热力的生产和供应业资金需求增幅最大，达到 1239 亿元，占 2020 年该部门产值的 1.77%。同时，该部门污染物排放量增长最为显著，达到 4.3 万吨。此外，由于电解槽隔膜成本高，导致上游的化学产品行业资金需求增长也较大，达到 1205 亿元。由于电解水制氢技术替代化石燃料制氢、焦炭炼钢、燃油汽车等传统技术，下游部门需减少投入，联动关联行业所有部门在 2024~2030 年间资金需求减少 2619 亿元，劳动力需求减少 28 万人，减少空气污染物排放 1.5 万吨。为支撑合成氨、合成甲醇、原油精炼等化工行业绿色转型，电解水制氢替代大量化石燃料制氢，化学产品行业受抑制影响最大，占所减少资金需求的 43%。综合来看，在 2024~2030 年间，电解水制氢技术发展需要各部门资金净增 4405 亿元，劳动力净增 41 万人，空气污染物排放净增 5 万吨。

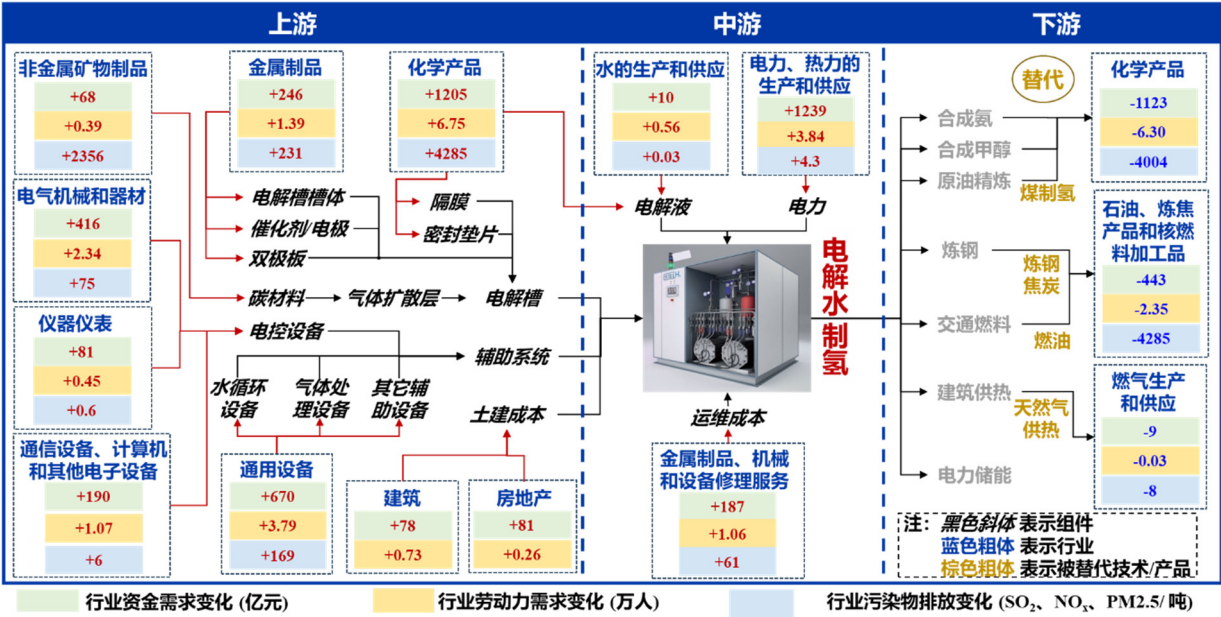


图 5 电解水制氢技术产业链风险图（例）

为保障电化学储能技术实现图 1 中的大规模发展，在 2024~2030 年间，全行业资金投入需增加 7412.49 亿元，劳动力需求增加 248.08 万人，并引致一定程度的环境影响，空气污染物排放量增加 4.48 万吨。平均每新增 1GW 装机将导致资金需求新增 48.81 亿元，劳动力需求新增 1.63 万人，空气污染物排放量增加 294.77 吨。随着电化学储能技术大规模发展，其上游的主要组件电池电芯、电池管理系统、储能逆变器和能量管理系统的生产需求大大增加，导致电气机械和器材制造行业的资金和劳动力需求变化量最大，资金投入增加 2850.89 亿元，劳动力需求增加 83.5 万人，同时，该行业引致的环境影响也最为明显，排放量增加 1.35 万吨。

对于钢铁行业而言，为发展电弧炉炼钢技术，在 2024~2030 年间，产业链共需新增资金投入 3099 亿元，新增劳动力 196 万人。新增资金需求其中，非金属矿物制品业由于上游石墨电极的生产需要对资金需求占比最大，约为 31.5%；新增劳动力需求中，专用设备业由于上游电炉设备生产需要占比最高，约为 51%。由于电弧炉炼钢技术会替代传统高炉-转炉炼钢技术，因此高炉-转炉技术产业链的上游行业需减少投入，产业链所有部门在 2024~2030 年间共需减少资金投入 633 亿元、劳动力 42 万人。煤炭采选业由于焦炭使用的大幅减少，其资金需求减少的占比最高，约为总减少量的 41.1%；金属冶炼和压延加工品行业由于生产效率提高以及长流程炼钢工艺对有色金属需求减少使得其劳动力剩余最多，占比达到劳动力总替代量的 88%。综合来看，在 2024~2030 年间，电弧炉炼钢技术的发展需要各部门资金投入

净增 2466 亿元，劳动力净增 154 万人。

对于水泥行业而言，多通道燃煤技术的快速普及将导致 2024~2030 年间产业链上相关行业资金需求增加 4570.56 亿元，上、下游分别占比 92.86%、7.14%；劳动力需求增加 3.1 万人。其中，上游金属冶炼和压延加工业的资金需求和劳动力需求净增量最大，分别达 1053.1 亿元和 5.3 万人，这是由于多通道燃煤技术的发展驱动了对燃烧器、煤风风机等组件的需求增长，进而对金属需求及其冶炼和加工活动产生影响。

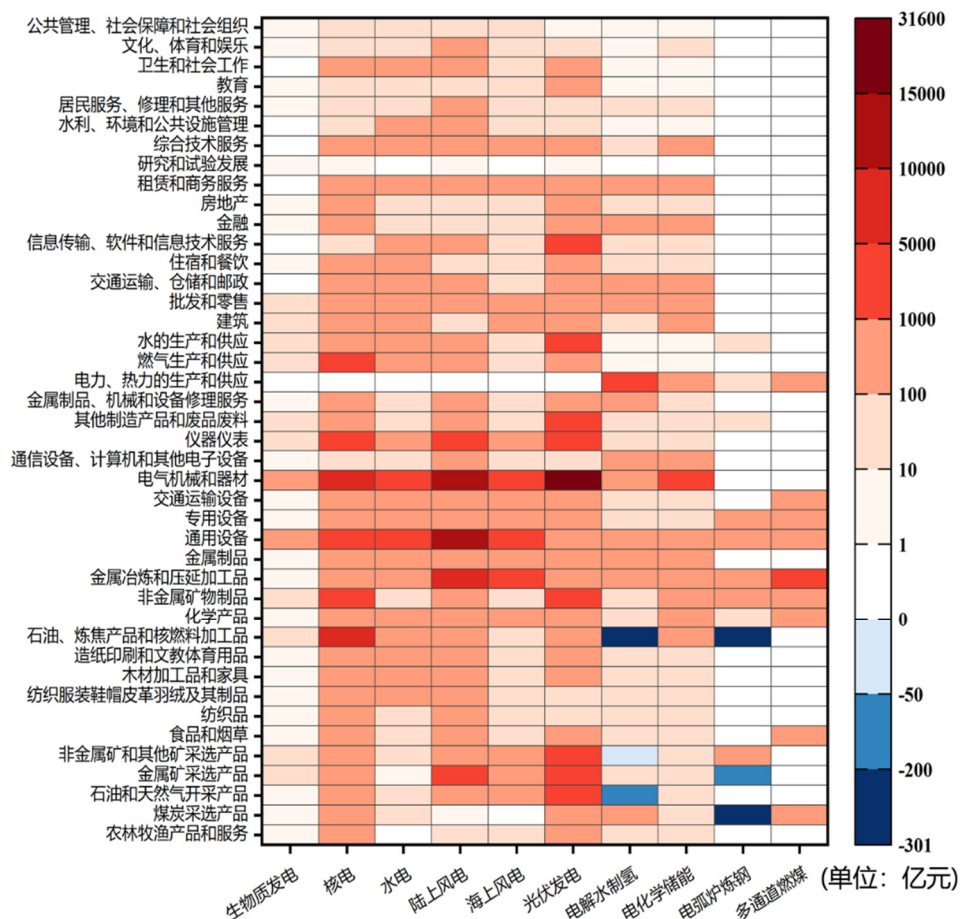


图 6 2024~2030 年低碳技术发展对各细分行业资金需求影响

图 6 进一步展示了 2024~2030 年低碳技术发展对产业链上各细分行业资金需求的影响。综合 10 项低碳技术的累计影响来看，电气

机械和器材制造业的资金需求增长最多，达 6.04 万亿元，主要是为了支撑光伏发电、陆上风电以及核电等技术发展。此外，通用设备制造业以 2.18 万亿元的新增资金需求量位居第二，金属冶炼和压延加工业次之。因此，随着上述关键低碳技术的规模化应用，电气机械和器材制造业、通用设备制造业、金属冶炼和压延加工业等将面临较为严峻的资金供给不足风险，需严防资金链断裂。

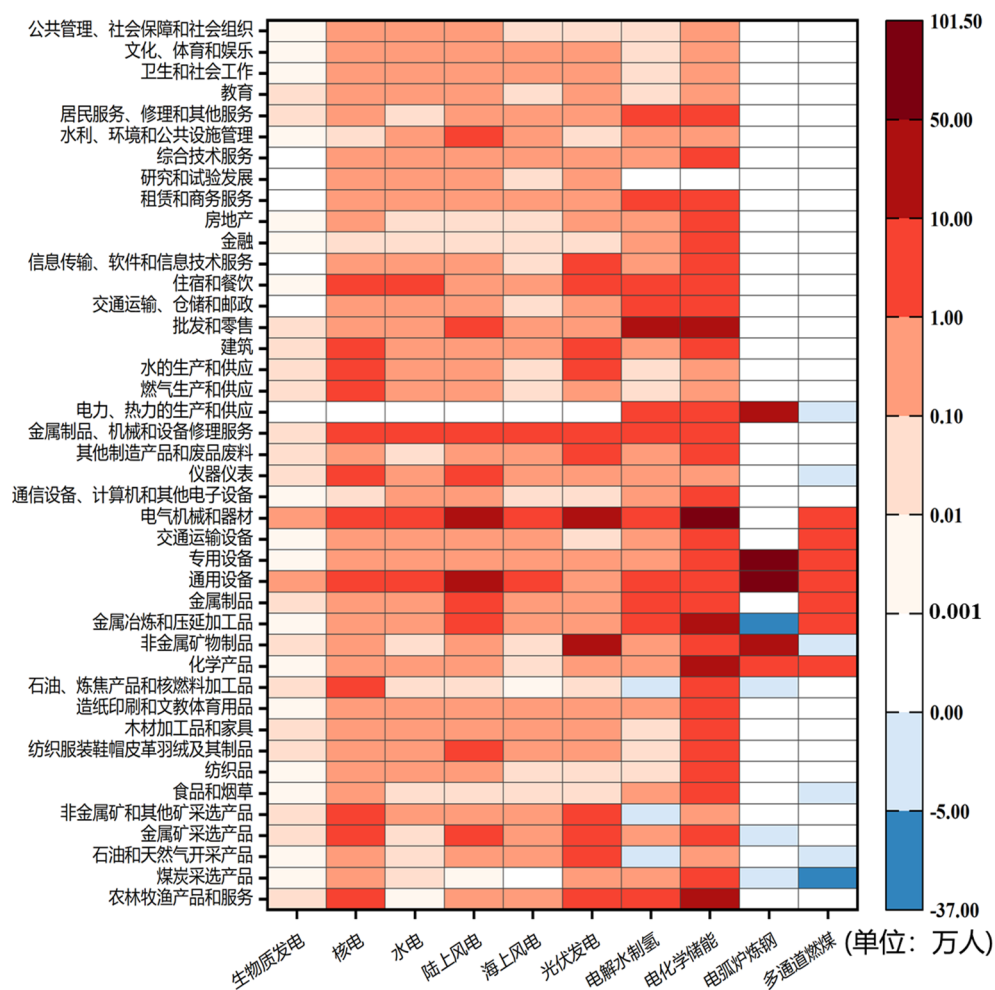


图 7 2024~2030 年低碳技术发展对各细分行业劳动力需求影响

图 7 为 2024~2030 年低碳技术发展对产业链上各细分行业劳动力需求的影响。其中，10 项低碳技术对电气机械和器材制造业劳动力需求的综合新增效应最大，达 128.8 万人，主要是由电化学储能、光

光伏发电和陆上风电技术发展所引致。此外，专用设备制造业和通用设备制造业分别以 105.75 万和 99.21 万的新增劳动力需求位居第二和三。因此，电气机械和器材制造业、专用设备制造业、通用设备制造业等可能面临的劳动力供给不足风险更大，而煤炭采选业将出现大量剩余劳动力。

图 8 展示了 2024~2030 年低碳技术发展对产业链上各细分行业污染物排放造成的影响。可见，金属矿采选业的污染物排放增加最多，达 14.83 万吨，主要是由于陆上风电、光伏发电和核电等技术大规模发展所致，非金属矿物制品业（+8.08 万吨）、金属冶炼和压延加工业（+6.02 万吨）次之，三者面临的环境影响攀升风险较为严重。

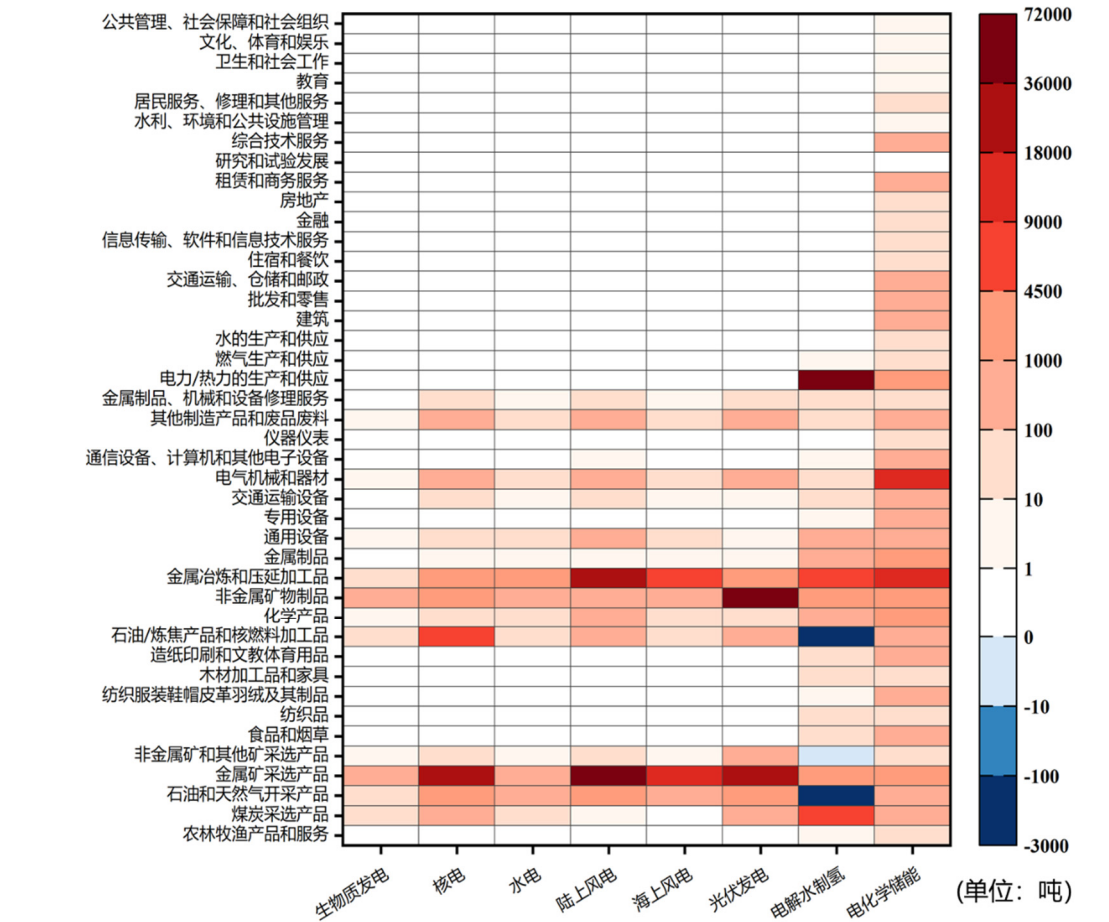


图 8 2024~2030 年低碳技术发展对各细分行业污染物产出的影响

三、政策建议

（一）谨防低碳技术发展面临的潜在关键矿产资源短缺风险，预先做好矿产战略部署。应增强钴、镍、铜和锰等关键矿产勘测开采，提高国内供应自主可控能力；推广生产、加工、利用、回收一体化模式，提升紧缺矿产资源的国内回收利用率；同时，积极拓宽海外供应渠道，保障我国关键矿产资源多元化稳定供应。

（二）关注低碳技术大规模发展引致的资金链断裂风险，提前做好产业规划布局。应重点关注如电气机械和器材制造业、通用设备制造业分别因光伏发电技术、风力发电技术等大规模发展而面临的资金供给不足风险，在投融资方面为光伏发电技术上游太阳能电池片、背板、接线盒、逆变器等光伏组件研发企业以及风力发电技术上游轴承、轮毂、塔架等风机组件的生产企业提供充分可持续的政策支持，创造良好的市场环境，引导其高质量发展，防止产业链关键环节断供，引发级联风险，确保关键低碳技术稳妥有序部署。

（三）提防低碳技术大规模发展引致的劳动力供需失衡风险，做好稳就业工作。需重点关注如电化学储能技术和电弧炉炼钢技术发展驱动的电气机械和器材制造业、专用设备制造业劳动力需求增长趋势，以及电弧炉炼钢技术由于替代传统长流程炼钢，减少其上游原材料焦炭的需求，从而导致煤炭采选业面临的劳动力过剩风险。应有序引导煤炭采选业等行业的过剩劳动力向电气机械和器材制造业等行业转移，加强电化学储能技术上游电池电芯、电池管理系统、储能逆变器和能量管理系统研发人才和电炉熔炼室专用设备人才培养，提前调整

高等教育、职业教育等相关专业布设，促使市场就业需求与劳动力相匹配，培养关键低碳技术发展进程所需的后备人才。

（四）关注低碳技术大规模普及造成部分行业环境影响攀升的风险，推进二氧化碳和污染物协同减排。应重点防范陆上风电、光伏发电和核电等低碳技术发展引发的金属矿采选业、非金属矿物制品业等面临的环境影响恶化风险，提前部署污染防治技术，实现清洁化生产。

主要参考文献

- [1] 中国政府网. 科技部等九部门关于印发《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030 年）》的通知. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/18/content_5705865.htm
- [2] 魏一鸣,余碧莹,唐葆君,刘兰翠,廖华,陈景明,孙飞虎,安润颖,吴郡,谭锦潇,邹颖,赵子豪.中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究[J].北京理工大学学报(社会科学版),2022,24(04):13-26.
- [3] IEA, 2021.An energy sector roadmap to carbon neutrality in China.
- [4] IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

北京理工大学能源与环境政策研究中心简介

北京理工大学能源与环境政策研究中心是 2009 年经学校批准成立的研究机构，挂靠在管理与经济学院。能源与环境政策中心大部分研究人员来自魏一鸣教授 2006 年在中科院创建的能源与环境政策研究中心。

北京理工大学能源与环境政策研究中心（CEEP-BIT）面向国家能源与应对气候变化领域的重大战略需求，针对能源经济与气候政策中的关键科学问题开展系统研究，旨在增进对能源、气候与经济社会发展关系的科学认识，并为政府制定能源气候战略、规划和政策提供科学依据、为能源企业发展提供决策支持、为社会培养高水平专门人才。

中心近年部分出版物

魏一鸣. 碳减排系统工程：理论方法与实践. 北京：科学出版社, 2023.

魏一鸣, 梁巧梅, 余碧莹, 廖华. 气候变化综合评估模型与应用. 北京：科学出版社, 2023.

廖华, 朱跃中. 我国能源安全若干问题研究. 北京：科学出版社, 2023.

刘兰翠, 刘丽静. 碳减排管理概论. 北京：中国人民大学出版社, 2023.

唐葆君, 王璐璐. 碳金融学. 北京：中国人民大学出版社, 2023.

余碧莹. 碳减排技术经济管理. 北京：中国人民大学出版社, 2023.

唐葆君. 项目管理——能源项目为例. 北京：科学出版社, 2022.

余碧莹, 张俊杰. 时间利用行为与低碳管理. 北京：科学出版社, 2022.

沈萌, 魏一鸣. 智慧能源. 北京：科学技术文献出版社, 2022.

魏一鸣. 气候工程管理：碳捕集与封存技术管理. 北京：科学出版社, 2020.

中心近年“能源经济预测与展望”报告

总期次	报告题目	总期次	报告题目
1	“十二五”中国能源和碳排放预测与展望	42	2019 年光伏及风电产业前景预测与展望
2	2011 年国际原油价格分析与走势预测	43	经济承压背景下中国能源经济发展与展望
3	2012 年国际原油价格分析与趋势预测	44	2020 年光伏及风电产业前景预测与展望
4	我国中长期节能潜力展望	45	砥砺前行中的新能源汽车产业
5	我国省际能源效率指数分析与展望	46	2020 年国际原油价格分析与趋势预测
6	2013 年国际原油价格分析与趋势预测	47	二氧化碳捕集利用与封存项目进展与布局展望
7	2013 年我国电力需求分析与趋势预测	48	2020 年碳市场预测与展望
8	国家能源安全指数分析与展望	49	我国“十四五”能源需求预测与展望
9	中国能源需求预测展望	50	基于行业视角的能源经济指数研究
10	2014 年国际原油价格分析与趋势预测	51	全球气候保护评估报告
11	我国区域能源贫困指数	52	全球气候治理策略及中国碳中和路径展望
12	国家能源安全分析与展望	53	新能源汽车产业 2020 年度回顾与未来展望
13	经济“新常态”下的中国能源展望	54	碳中和背景下煤炭制氢的低碳发展
14	2015 年国际原油价格分析与趋势预测	55	2021 年国际原油价格分析与趋势预测
15	我国新能源汽车产业发展展望	56	中国省际能源效率指数（2010-2018）
16	我国区域碳排放权交易的潜在收益展望	57	后疫情时代中国能源经济指数变化趋势
17	“十三五”及 2030 年能源经济展望	58	电力中断对供应链网络的影响
18	能源需求预测误差历史回顾与启示	59	2022 年国际原油价格分析与趋势预测
19	2016 年国际原油价格分析与趋势预测	60	全国碳中和目标下各省碳达峰路径展望
20	2016 年石油产业前景预测与展望	61	迈向碳中和的电力行业 CCUS 发展行动
21	海外油气资源国投资风险评价指数	62	中国碳市场回顾与展望（2022）
22	“十三五”北京市新能源汽车节能减排潜力分析	63	全球变暖对我国劳动力健康影响评估
23	“十三五”碳排放权交易对工业部门减排成本的影响	64	中国上市公司碳减排行动指数研究报告
24	“供给侧改革”背景下中国能源经济形势展望	65	2022 年中国能源经济指数研究
25	2017 年国际原油价格分析与趋势预测	66	省级能源高质量发展指数研究（2012-2022 年）
26	新能源汽车推广应用：2016 回顾与 2017 展望	67	中国电力部门省际虚拟水流动模式与影响分析
27	我国共享出行节能减排现状及潜力展望	68	2023 年国际原油价格分析与趋势预测
28	我国电子废弃物回收处置现状及发展趋势展望	69	中国碳市场回顾与最优行业纳入顺序展望（2023）
29	2017 年我国碳市场预测与展望	70	我国 CCUS 运输管网布局规划与展望
30	新时代能源经济预测与展望	71	全球变暖下区域经济影响评估
31	2018 年国际原油价格分析与趋势预测	72	迈向中国式现代化的能源发展图景
32	2018 年石化产业前景预测与展望	73	2024 年中国能源经济指数研究及展望
33	新能源汽车新时代新征程:2017 回顾及未来展望	74	低碳技术发展产业链风险评估和展望
34	我国电动汽车动力电池回收处置现状、趋势及对策	75	中国省际能源高质量协同发展测度
35	我国碳交易市场回顾与展望	76	实现碳中和目标的 CCUS 产业发展展望
36	新贸易形势下中国能源经济预测与展望	77	2024 年国际原油价格分析与趋势预测
37	2019 年国际原油价格分析与趋势预测	78	2024 年成品油价格分析与趋势预测
38	我国农村居民生活用能现状与展望	79	2024 年国际天然气市场分析与趋势预测
39	高耗能行业污染的健康效应评估与展望	80	中国碳市场建设成效与展望（2024）
40	我国社会公众对雾霾关注的热点与展望	81	中国能源经济形势分析与研判（2024）
41	我国新能源汽车行业发展水平分析及展望		